

Предлагается аналитические выражения для вычисления значения величины коммутационного ресурса вакуумных выключателей при синхронном отключении в сравнении с обычной коммутацией

УДК 621.316.542

А.А. Гилёв, к.т.н., доц.,
В.Н. Данилов, инженер,
В.С. Миронов, аспирант.
Севастопольский национальный технический университет

ОЦЕНКА РОСТА КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПРИ СИНХРОННОМ ОТКЛЮЧЕНИИ

В настоящее время в силовых электрических цепях среднего напряжения широкое распространение получили вакуумные выключатели, обладающие целым рядом преимуществ перед другими типами коммутационных аппаратов, таких, как долговечность, малый ход контактов, высокая электрическая прочность вакуума и скорость ее восстановления, широкий диапазон рабочих температур, независимость рабочего положения и ряд других.

Долговечность вакуумного выключателя обусловлена коммутационным ресурсом вакуумной камеры, который составляет $10^4 \dots 5 \cdot 10^4$ циклов включения – отключения для номинальных токов. Однако с ростом амплитуды отключаемого тока в тяжелых и аварийных режимах ресурс камеры и всего аппарата резко снижается и при номинально отключаемых токах составляет 25 ... 50 рабочих циклов. Проблема увеличения коммутационного ресурса может быть решена применением синхронной коммутации, т.е. включением вблизи нуля сетевого напряжения и отключением вблизи нуля тока.

При этом возникает проблема численной оценки роста коммутационного ресурса выключателя при синхронном отключении в сравнении с обычной коммутацией.

Коммутационный ресурс вакуумных выключателей определяется их главным элементом – вакуумной дугогасительной камерой (ВДК). К числу основных критериев годности, при испытании вакуумных выключателей на ресурс при коммутационной стойкости, относится износ контактов ВДК[1]. Износ (электрическая эрозия) контактов зависит от свойств вакуумной дуги (ВД), на которые в свою очередь влияют значение коммутируемого тока и следующие конструктивные факторы [2]:

- 1) материал контактов;
- 2) конфигурация и размер контактных систем;
- 3) расстояние между контактами;
- 4) скорость хода подвижного контакта при включении и отключении тока

В работе [3] в качестве обобщенного показателя эрозионного износа контактов используют удельный износ контактов

$$\alpha_1 = \frac{\Delta h_{\text{дон}} \times S \times \rho}{I \times N_{\text{ном}}} \quad (1)$$

где α_1 - удельный износ контактов,

$\Delta h_{\text{дон}}$ – предельно допустимое значение линейного износа контактов ВДК, см;

S - площадь поверхности контактирования, см²;

ρ – плотность контактного материала г/см³;

I – действующее значение тока, при котором проводилось отключение, кА;

– номинальный коммутационный ресурс камеры, число циклов ВО.

В современных ВДК используются хромомедные контакты, для которых ρ составляет либо 8 г/см³ (CuCr 50/50) либо 8,3 г/см³ (CuCr 30/70), а α выражается зависимостью, представленной на рис. 1.

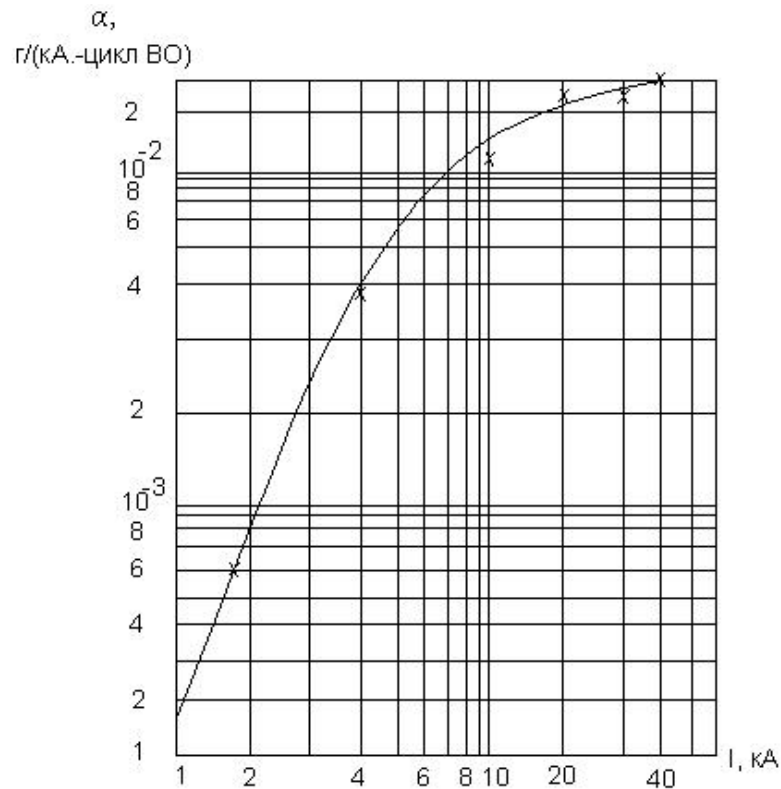


Рис. 1. Зависимость удельного износа α хромомедных контактов от тока в ВДК

Как следует из рисунка, зависимость α (I) до 5 кА можно аппроксимировать функцией

$$\alpha_1 = 1,7 \times 10^{-4} \times I^{2,3} \quad (2)$$

При токах выше 5 кА была получена математическая модель с использованием полинома вида:

$$\alpha_2(I) = 0,0299439 + 0,231797 \times I^2 - 0,0102795 \times I^3 + 6,002515 \times 10^{-6} \times I^5 - 7,2664018 \times 10^{-8} \times I^6 \quad (3)$$

В практических расчётах разрядность коэффициентов можно уменьшить.

Ниже приведена таблица сравнения расчетных и исходных данных

Таблица № 1

Оценка точности описывающего полинома

I, кА	0	1	1,8	4,1	10	20	35	40	50
α_2	0	0,18	0,55	3,5	13,5	25	25	30	35
α_2^*	0,03	0,25	0,72	3,22	13,45	25	24,9	30	34,9
$\Delta\alpha\%$		39,7	31,1	7,9	0,3	0,3	0,3	0,1	0,007

Здесь α_2^* - значение α_2 , вычисленное в силу коэффициентов полинома.

Таким образом, предложенный полином хорошо описывает большую часть исходных данных, но может на некоторых участках давать результаты, отличающиеся от экспериментальных данных. Если необходимо более точное описание, то следует разбить экспериментальную кривую на участки (линейные и степенные) и рассматривать систему, где каждое уравнение будет описывать соответствующий участок. Условие склейки будет вытекать из непрерывности зависимости $\alpha = f(I)$, которая следует из физического смысла зависимости.

При $f = 50$ Гц и справедливости гипотезы о равномерном распределении момента начала расхождения контактов, а также допущении, что дуга гаснет при первом прохождении тока через ноль, величина Δt будет равна 5 мс, где Δt - математическое ожидание начала движения контактов при несинхронном отключении тока.

Для оценки коммутационного ресурса синхронных выключателей следует учесть, что момент начала расхождения контактов в этом случае строго фиксирован и составляет от 0,5...2 мс, в зависимости от быстродействия привода и допустимой скорости перемещения подвижного контакта ВДК. Это время обозначается $t_{упр}$. Оно всегда меньше Δt и, значит, меньше термического воздействия дуги на контакты камеры. Введём коэффициент

$$k_m = \frac{\Delta t}{t_{упр}} \quad (4)$$

Для синхронного отключения получим формулу коммутационного ресурса

$$N_{синхр} = 2 \times \frac{N_{ном} \times \alpha_1}{\alpha_2} \times k_m \quad (5)$$

Коэффициент 2 учитывает отсутствие эрозионного износа контактов при синхронном включении аппарата, поскольку повсюду принимается равенство эрозии контактов при включении и выключении.

Практически представляется интересным получение зависимости коэффициента роста коммутационного ресурса от величины отключаемого тока и времени упреждения синхронного выключателя. При этом вышеуказанный коэффициент представляет собой отношение

$$k_{синхр} = \frac{N_{синхр}}{N_{ном}} \quad (6)$$

и интересующая зависимость в общем виде получит выражение

$$k_{синхр} = f(t_{упр}, I_{откл}) \quad (7)$$

Понятно, что для каждого типа аппаратов будет различным, как и различной будет зависимость. Но в относительных единицах можно дать общую картину увеличения коммутационного ресурса в функции указанных величин.

Итак

$$k_{синхр} = \frac{N_{синхр}}{N_{ном}} = \frac{2\alpha_1}{2\alpha_2} \times k_m \quad (8)$$

До величин I от 0 до 5 кА α будет равно, согласно формуле (2)

$$\alpha_1 = 1,7 \times 10^{-4} \times I^{2,3}$$

При промышленной частоте $f=50$ Гц

$$k_m = \frac{\Delta t}{t_{ynp}} = \frac{5}{t_{ynp}},$$

где 5 – математическое ожидание момента движения контактов выключателей при несинхронной коммутации.

Таким образом, при $0 \leq I \leq 5$ кА можно подсчитать по формуле

$$k_{синхр} = \frac{2 \times \sqrt{1,7 \times 10^{-4} \times I^{2,3} \times 5}}{1,7 \times 10^{-4} \times (I \sin \psi)^{2,3} \times t_{ynp}} = \frac{10}{(\sin \psi)^{2,3} \times t_{ynp}} = \frac{10}{(\sin(18^\circ \times t_{ynp}))^{2,3} \times t_{ynp}} \quad (9)$$

$$\psi = \frac{180^\circ \times t_{ynp}}{10} = 18^\circ t_{ynp}.$$

Это выражение не зависит от I . В более широком диапазоне отключаемых токов

$$k_{синхр} = 2 \times \frac{\alpha_1(I)5}{\alpha_2(I \sin \psi)t_{ynp}} = \frac{10\alpha_1(I)}{\alpha_2(I \sin(18^\circ \times t_{ynp}))t_{ynp}} \quad (10)$$

Трёхмерный вид функции будет иметь вид, представленный на рис. 2

Здесь $k \rightarrow \infty$ при $I \rightarrow 0$ и $t_{ynp} \rightarrow 0$ поскольку в этом случае эрозионного износа контактов не будет.

$0 \leq t_{ynp} \leq 5$ мс, поскольку в противном случае будет меньше 1;

$0 \leq I \leq 40$ кА, верхняя граница обусловлена верхним значением отключаемого тока в экспериментах по определению α .

Таблица 2

Значения в функции от I и t_{ynp}

$t_{ynp}, \text{ мс} \backslash I, \text{ кА}$	0,1	1	2	3	4	5
0	100	10	5	3,33	2,5	2
10	25636	69,3	11,23	4,51	2,68	2
20	21090	38,53	7,59	3,71	2,54	2
30	10560	19,78	5,04	3,16	2,47	2
40	8001	17,16	5,91	5,17	2,72	2
50	6228	16	7,26	3,8	2,29	2

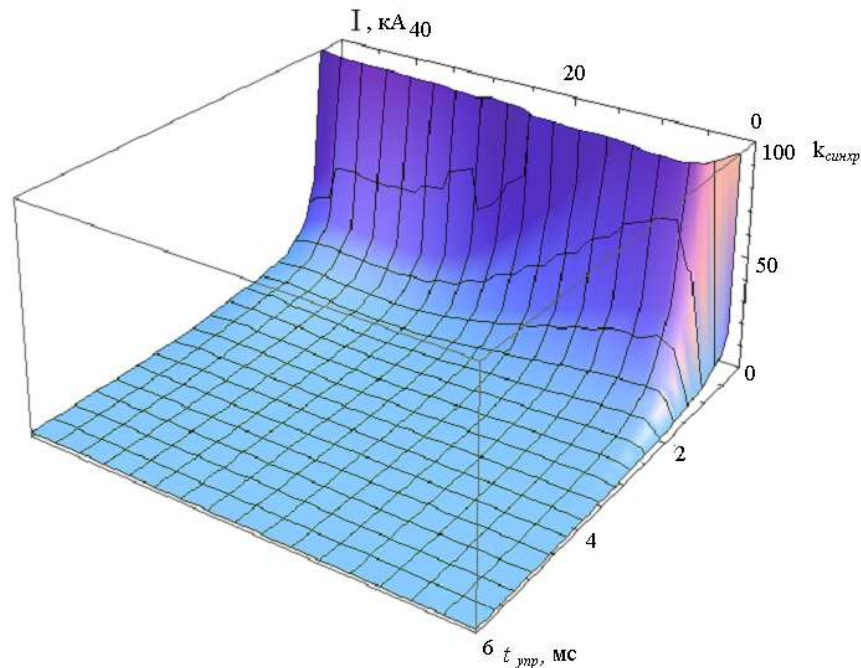


Рис.2. Поверхность коэффициента относительного роста коммутационного ресурса в функции от времени упреждения и отключаемого тока

По данной поверхности можно легко определить величину для широкого диапазона величин $t_{упр}$ и I .

Пример.

Для любого номинального тока $0 \leq I \leq 5$ кА коэффициент увеличения коммутационного ресурса при $t_{упр} = 2$ мс будет равен

$$k_{синхр} = \frac{10}{(\sin 36^\circ)^{2,3} \times 2} = 17,$$

т.е. ресурс вырастет в 17 раз.

При таком же времени упреждения, но токе отключения 20 кА получим

$$k_{синхр} = \frac{10 \times \alpha_1(I)}{\alpha_2(I \sin 36^\circ) \times 2} = \frac{5 \times 25}{14} = 8,928$$

$$\alpha_1(20) = 25$$

$$\alpha_2(20 \sin 36^\circ) = \alpha_2(11,756) = 14$$

т.е. ресурс выключателей при $t_{упр}$ равном 2 мс при номинальном токе отключения увеличивается в 9 раз.

Литература

1. Ромочкин Ю.Г. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер с аксиальным магнитным полем / Ю.Г. Ромочкин, И.А. Лукацкая // Электротехника - 2005. - №2. - с.9 – 15
2. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / В.И. Раховский. – М.: Наука, 1970. – 536с.
3. Лукацкая И.А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер / И.А.Лукацкая // Электротехника – 1996. – №8. – С.53 – 5

ОЦІНКА РОСТУ КОМУТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ
ПРИ СИНХРОННОМУ ВІДКЛЮЧЕННІ

О.О. Гильов, В.Н. Данилов, В.С. Миронов

Пропонуються аналітичні вирази для обчислення значення величини комутаційного ресурсу вакуумних вимикачів при синхронному відключенні в порівнянні зі звичайною комутацією.

COMMUTATION LIFE APPRAISEL OF VACUUM BREAKER AT SYNCHRONIZED
SWITCHING OFF

A.A Gilyev, V.N. Danilov, V.S.Mirnov

Analytical expressions are offered for calculation of importance of the value commutation resource of the vacuum breakers under synchronous breaking-off in comparison with usual switching.